

# ノンスリップ型露出柱脚を有する門型フレームに関する研究

山西 央朗\*・高松 隆夫\*\*・玉井 宏章\*\*・福原 章宏\*\*\*

(平成21年10月31日受理)

## A study on steel portal frame with non-slip-type exosed colum-base

Teruaki YAMANISHI, Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI and Akihiro FUKUHARA

(Received Oct. 31, 2009)

### Abstract

Anchor-bolt-yield-type exposed column bases are generally employed in steel buildings. Restoring force characteristics of the building deteriorate, because cyclic curves show slip behavior due to anchor-bolts yielding and rigidity of the column base decreases. Non-slip-type column bases were proposed by authors to improve slip behavior. In this paper, loading tests were carried out on steel portal frames with column base to clarify response of the frames.

**Key Words:** Anchor-bolt-yield-type exposed column-base, Portal frame, Variable axial-force

## 1. はじめに

著者等は、アンカーボルト降伏先行型露出柱脚のスリップ現象を改善する、ノンスリップ型露出柱脚を提案・研究している。これまで、露出柱脚付き片持ち柱を用いた要素実験を行い<sup>1-14)</sup>、各荷重下におけるノンスリップ型露出柱脚の復元力特性を示してきた。また、柱脚付き門型フレームの振動台実験および地震応答解析により、柱脚をノンスリップ型露出柱脚とすることで、スリップ現象による骨組の剛性低下を防ぎ弾塑性加振試験時においても安定した振動性状が得られること<sup>15)</sup>、構造物の残留変形を低減する効果が得られ、かつ、第一層上梁(2階の床部分の梁)への損傷集中が緩和される傾向にあることが明らかになっている<sup>16)</sup>。

一方、構造物の側柱では、柱脚部に作用する柱軸力が変動する場合がある。アンカーボルト降伏先行型露出柱脚では、柱軸力の影響で復元力特性が変化することは知られているが<sup>13,14,17)</sup>、これまでの架構実験・解析の研究では、変動軸力による復元力特性の変化が骨組に及ぼす影響を十分

に議論できていない。特に、引張軸力領域を含む場合について、ノンスリップ型露出柱脚を用いることで、骨組にどのような利点をもたらすのかを検討する必要がある。また、従来のアンカーボルト降伏先行型露出柱脚についても、変動軸力による影響を考慮した研究は数が少なく<sup>17-20)</sup>、基礎的な資料を蓄積する必要がある。

そこで、本論文では、1層1スパンの柱脚付き門型フレーム試験体を用いて、柱脚に引張軸力領域を含む変動軸力が作用する載荷実験を行い、変動軸力を考慮した柱脚付き門型フレームの抵抗特性について検討する。また、ノンスリップ型および従来のアンカーボルト降伏先行型露出柱脚(従来型露出柱脚)の実験結果を比較・検討し、ノンスリップ型露出柱脚の優位点を明らかにする。

## 2. 実験

本実験では、柱脚付き門型フレームを用いて、柱脚をノンスリップ型露出柱脚および従来型露出柱脚とした場合の繰返し載荷実験を行う。

\* 広島工業大学高性能構造システム開発研究センター

\*\* 広島工業大学工学部建築工学科

\*\*\* 広島工業大学大学院工学系研究科建設工学専攻

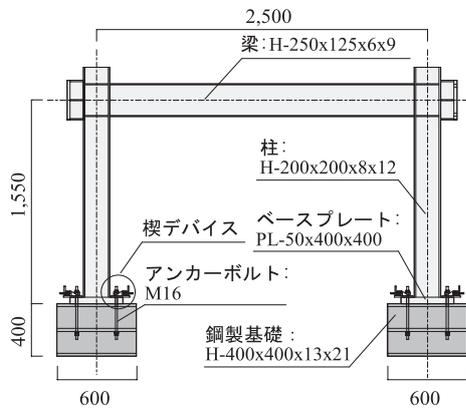
表1 素材特性と主要寸法

	材質	$E$ ( $N/mm^2$ )	$\sigma_y$ ( $N/mm^2$ )	$\sigma_u$ ( $N/mm^2$ )	主要寸法 (mm)	各降伏耐力 (kN, kNm)
柱	フランジ	SS400	205,000	304	H-200x200x8x12	$M_y = 140$
	ウェブ		205,000	332		
梁	フランジ	SS400	205,000	327	H-250x125x6x9	$M_y = 102$
	ウェブ		205,000	429		
ベースプレート	SS400	205,000	388	522	PL-400x400x50	$M_y = 68.2$
アンカーボルト	:S	ABR400	205,000	300	$\phi_g = 14.6, ab\ell = 350$	$T_y = 49.5, M_y = 35.2$
	:N	ABR400	205,000	300		

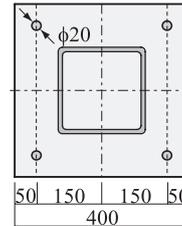
$E$ : ヤング係数     $\sigma_y$ : 降伏応力度     $\phi_g$ : 軸部径     $ab\ell$ : 有効長さ

表2 バネ特性

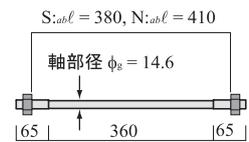
外径 (mm)	バネ径 (mm)	自由長さ (mm)	最大たわみ (mm)	最大荷重 (N)	バネ定数 (N/mm)
26.1	2.0	94.0	70.3	93.5	1.33



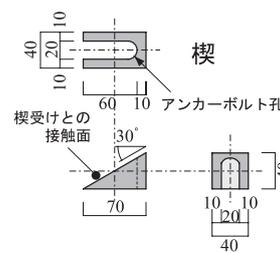
(a) セットアップ



(b) ベースプレート



(c) アンカーボルト



(d) 楔デバイス

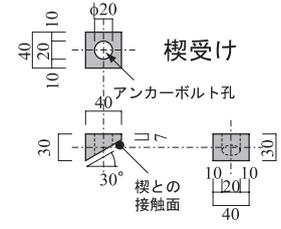


図1 試験体

## 2.1 試験体

表1, 表2に試験体の素材特性と主要寸法, 楔デバイスに用いるバネのバネ特性を示す。また, 図1に試験体形状を示す。尚, 本実験では, アンカーボルト降伏先行型露出柱脚を取扱うために, ベースプレート, 柱, 梁, および, 基礎部分には, 各载荷に対して弾性範囲に留まる素材特性・断面性能を採用している。(ベースプレートの降伏耐力は, ヒンジラインを仮定して, 降伏線理論より算出している<sup>21)</sup>。)

試験体には, ノンスリップ型露出柱脚を有する門型フレーム (Type N) と, 従来型露出柱脚を有する門型フレーム (Type S) を用意した。

柱には H-200x200x8x12 を, 梁には H-250x125x6x9 を使用し, 柱下端部にベースプレートを隅肉溶接接合し, 柱を強軸方向の通し柱として梁を保有耐力接合したものである。柱脚には, ベースプレートの隅角部にアンカーボルトを配置した PL-50x400x400 を使用する。また, 実験時には軸部降伏軸力の 30% (15kN) を初期軸力として導入している。アンカーボルトには十分な塑性変形能力を期待で

きる転造ねじアンカーボルト M16 を使用する。基礎部には, いずれの载荷に対しても塑性化しない, 鋼製基礎 H-400x400x13x21 を使用し, 適宜スチフナを配置している。

楔デバイスの楔および楔受けは, 楔貫入角度を 30° とし, かつ, 楔と楔受けの接触面には, 発錆処理 (塩分濃度 5% 程度の食塩水により, 1 週間ほど湿潤状態を保つ) を施して, 静止摩擦係数  $\mu$  を増大させている ( $\mu=0.73$ )。尚, この発錆処理は, アンカーボルトから伝達される圧縮力の接触面方向分力に対して, 接触面における摩擦力により抵抗し, 滑らないようにするために施している。

## 2.2 载荷装置と载荷方法

図2に载荷装置を示す。载荷は, 試験体柱頭部に水平の油圧ジャッキを設置し, 水平変位  $\delta$  を制御値とした正負交番漸増繰返し载荷を行う。目標値を, 1/1,000, 1/500, 1/250, 1/125, 1/75 として, それぞれ, 2 サイクル行う。

## 2.3 計測方法と整理方法

図3に計測位置を示す。変位計測は, 基礎部に設けた計

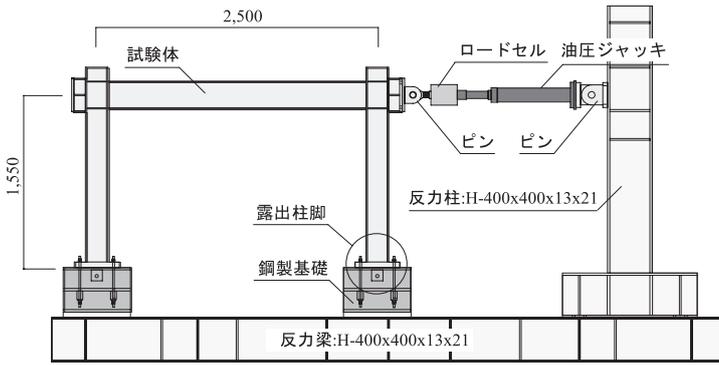


図2 荷重装置

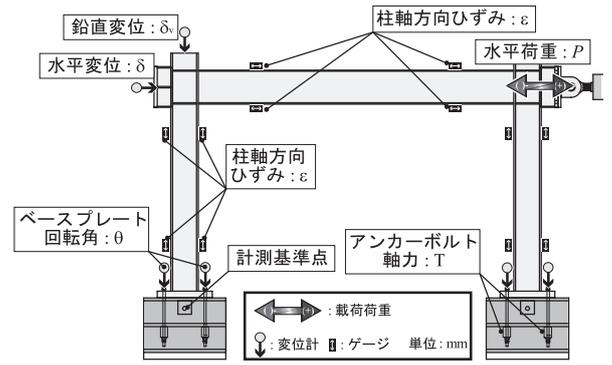


図3 計測位置

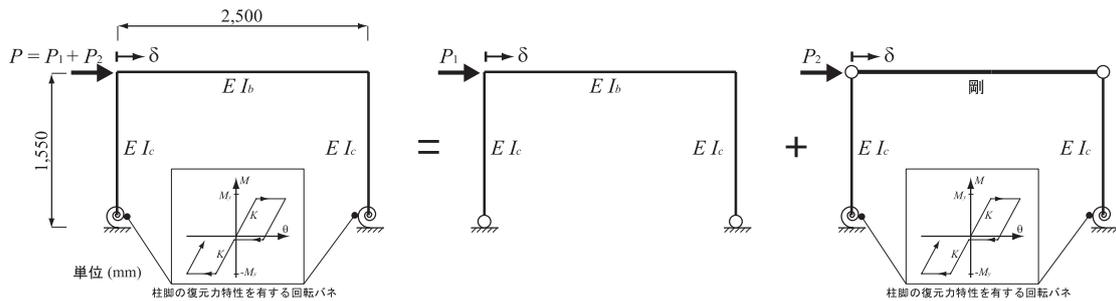
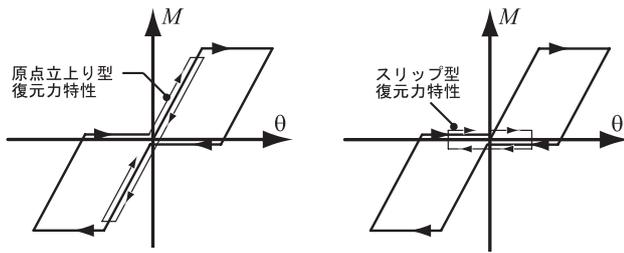


図4 解析モデル



(a) ノンスリップ型露出柱脚 (b) 従来型露出柱脚

図5 各柱脚の無軸力下の復元力特性モデル

測基準点に設置した計測治具からの相対変位を計測している。変位としては、柱頭部に設置した変位計により、柱頭部水平変位  $\delta$ 、柱頭部鉛直変位  $\delta_v$  を、柱下端部に設置した変位計により鉛直変位を計測しベースプレート回転角  $\theta$ 、柱脚部鉛直変位  $\delta_v$  を算出する。荷重としては、ジャッキ先端のロードセルにより水平荷重  $P$  を、アンカーボルト下端部に設置したセンターホール型ロードセルによりアンカーボルト軸力  $T$  を計測する。また、柱・梁フランジに貼付したひずみゲージにより垂直ひずみを計測し、柱脚曲げモーメント  $M$ 、柱軸力  $N$  と骨組の曲げモーメント図を算出する。

### 3. 解析モデル

図4、図5に解析モデルと、柱脚の復元力特性モデルを示す。

#### 3.1 解析モデルの概要

解析モデルには、柱脚部に回転バネを有するフレームを用いる。これを、柱脚部をピン接合としたフレームと、柱脚部を回転バネ、柱頭部をピン接合としたフレームに分解する。それぞれの柱頭部に水平方向の強制変位  $\delta$  を作用させ、抵抗力  $P_1$ 、 $P_2$  を算出し、これ等を累加したものを、柱脚付き門型フレームの復元力 (水平荷重  $P$ ) とする。尚、抵抗力の計算には、柱・梁の断面二次モーメント  $I_c$ 、 $I_b$  を用いる。

#### 3.2 柱脚部の復元力特性モデル

柱脚部の復元力特性モデルには、図5に示すように、ノンスリップ型露出柱脚では原点立上り型の復元力特性を、従来型露出柱脚ではスリップ型の復元力特性を用いる。

また、柱脚の降伏曲げ耐力  $M_y$ 、および、弾性回転剛性  $K_{BS}$  は以下の式により求める。

$$M_y = n \cdot {}_{ab}A \cdot {}_{ab}\sigma_y \cdot d \quad (1)$$

$$K_{BS} = \frac{E \cdot n \cdot {}_{ab}A \cdot d^2}{R \cdot {}_{ab}l} \quad (2)$$

ここに、 $n$ : 引張側アンカーボルト本数、 ${}_{ab}A$ : アンカーボルト軸部断面積、 ${}_{ab}\sigma_y$ : アンカーボルト降伏応力度、 $d$ : 引張側アンカーボルト中心から圧縮合力点位置までの距離、 $E$ : アンカーボルトのヤング係数、 $R$ : ベースプレートと基礎の弾性変形を考慮した低減係数 ( $=2.0$ )<sup>17)</sup>、 ${}_{ab}l$ :

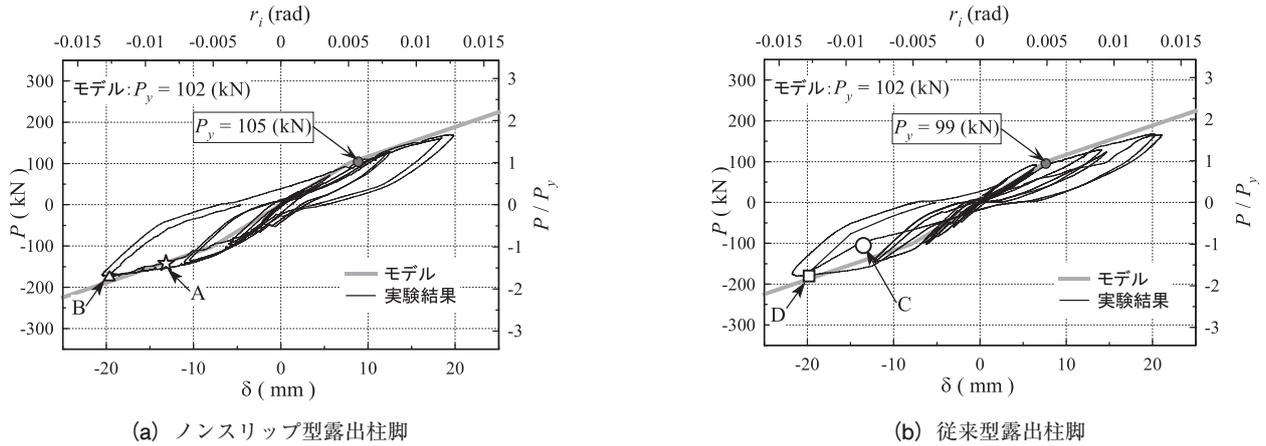


図6 水平荷重  $P$  - 水平変位  $\delta$  関係

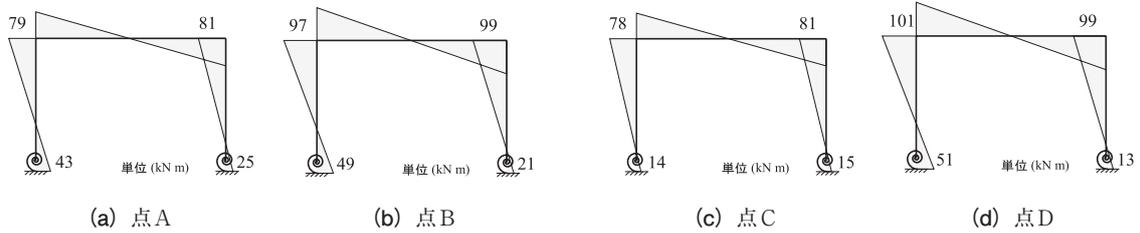


図7 各時点の曲げモーメント図

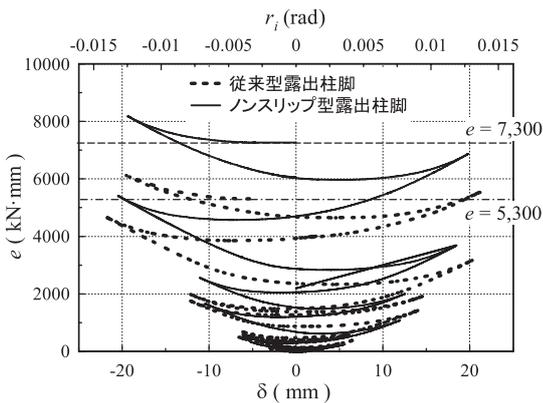


図8 エネルギー吸収量  $e$  - 水平変位  $\delta$  関係

アンカーボルトの有効長さである。

このように、柱脚部の復元力特性は、軸力が変動することによる影響を無視して計算する。

#### 4. 実験結果と考察

図6 - 12に各試験体の実験結果を、それぞれ、示す。図6に水平荷重  $P$  - 水平変位  $\delta$  関係を、図7に図6中に示す各点の曲げモーメント図を、図8にエネルギー吸収量  $e$  - 水平変位  $\delta$  関係を、図9に柱脚・柱頭部鉛直変位  $c\delta_v$ 、 $b\delta_v$  - 水平変位  $\delta$  関係を、図10に柱脚の曲げモーメント  $M$  - ベースプレート回転角  $\theta$  関係を、図11にアンカーボルト軸力  $T$  - ベースプレート回転角  $\theta$  関係を、図12に柱軸力  $N$  - ベースプレート回転角  $\theta$  の関係を、それぞれ、示す。

但し、エネルギー吸収量  $e$  は、図6の履歴面積を積分して算出している。また、柱脚の  $M - \theta$  関係は、左右の柱脚ではほぼ一致した挙動を示しているので、図2中の左側の柱脚（正の水平荷重時に、正の回転角を示す）の結果のみを示す。

また、図6には3章に示した解析モデルを、図10には3章に示した柱脚の復元力特性モデルおよび図12に示したモデル用の軸力を用いて、文献<sup>13,14</sup>の計算方法により算出した（変動軸力を考慮した）復元力特性モデルを、また、図6、図10にはそれぞれ、柱脚降伏時の耐力を降伏耐力  $P_y$ 、 $M_y$  として、それぞれ、示す。更に、図9には、最終サイクルのフレームと柱脚の挙動の概念図も併せて示している。

尚、図6、8、9中の上横軸は、水平変位を階高で除して求めた層間変形角  $r_i$  を示している。

##### 4.1 水平荷重 - 水平変位関係

図6より、ノンスリップ型露出柱脚の場合は、いずれの荷重サイクルにおいても、荷重時の履歴曲線はほぼ一致している。一方、従来型露出柱脚の場合においては、前サイクルの除荷時の履歴曲線に一致している。これは、図10、11の結果から分かるように、従来型露出柱脚ではスリップ現象が発生しているが、ノンスリップ型露出柱脚では、スリップ現象が改善されて、原点立上り型復元力特性を示しているためである。このように、柱脚の復元力特性はフレー

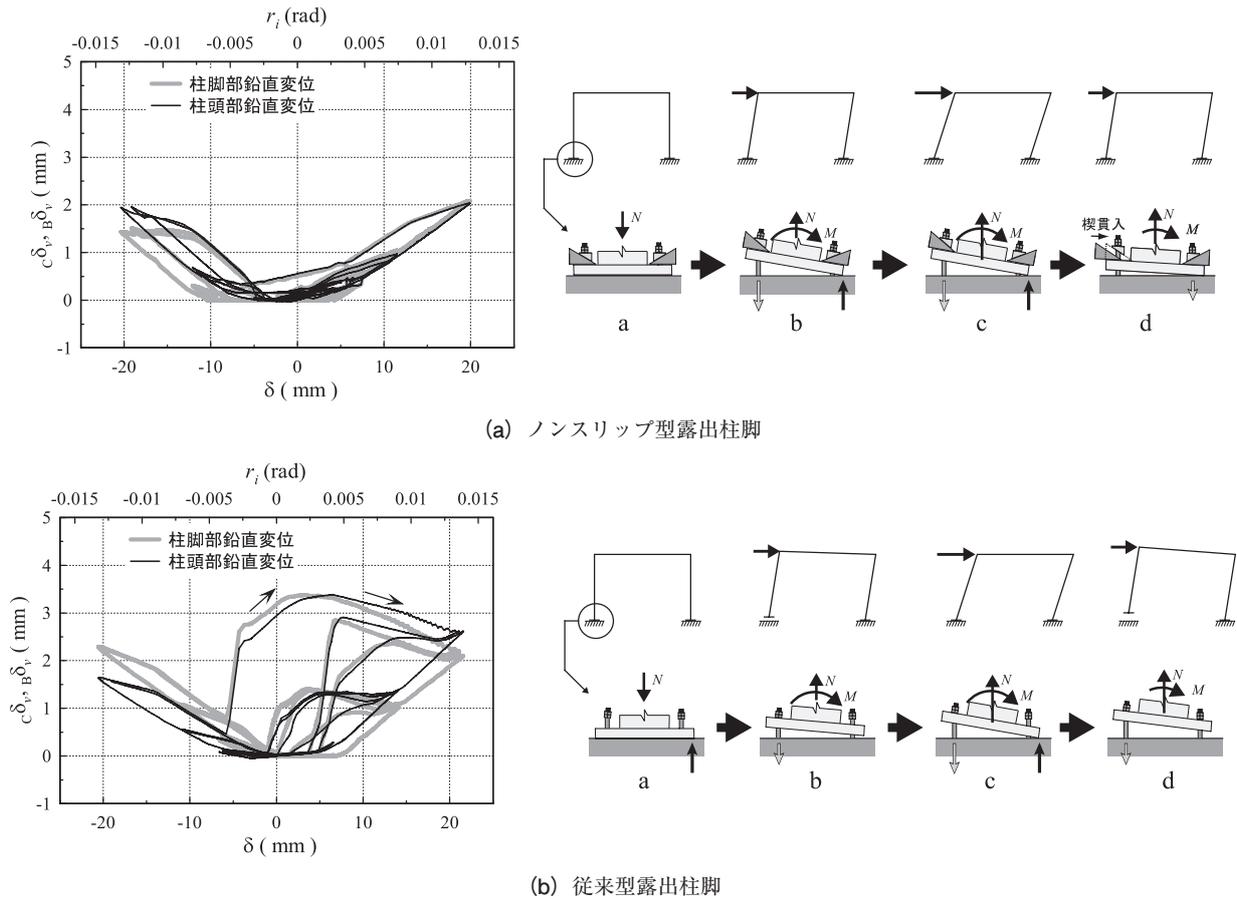


図9 柱頭・柱脚部鉛直変位  $c\delta_v, B\delta_v$  - 水平変位  $\delta$  関係

ムの挙動にも影響を与えることが分かる。但し、ノンスリップ型露出柱脚の場合においても、柱脚の降伏曲げ耐力および弾性回転剛性は、従来型露出柱脚と同じであるため、フレームの弾性剛性や各耐力は増減しない。しかしながら、図8の結果より、フレームが吸収したエネルギー吸収量は、ノンスリップ型露出柱脚の場合、従来型露出柱脚の場合の約1.4倍(=7,300/5,300)程度となっている。

また、本論文で示した解析モデルの結果は、実験結果とほぼ一致しており、実験結果と解析モデルの柱脚降伏時耐力の比は、0.97～1.03となっている。解析モデルでは、柱脚の復元力特性モデルを無軸力下のものを使用しているが、図10から分かるように、柱脚では変動軸力の影響により、無軸力下の復元力特性とは異なる挙動を示し、正方向と負方向の降伏曲げ耐力等も異なっている。これら、柱脚の復元力特性の変化を考慮しなくても、フレームの挙動を追跡できるのは、左右の柱脚で、変動軸力の影響を相殺しているからであると考えている。

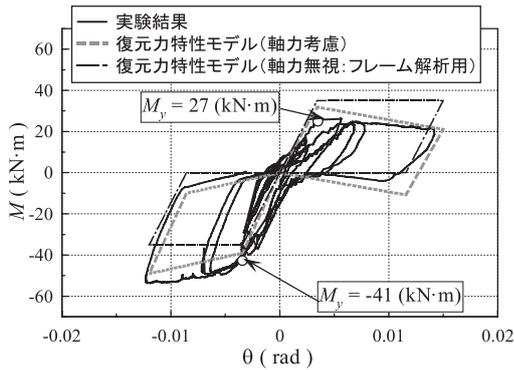
#### 4.2 フレームの曲げモーメント図

図7から、柱脚部がスリップ現象を起こしている点Cとスリップ現象が発生していない点Aとを比較した場合、各点の柱頭部曲げモーメントの比は0.99～1.00であり、

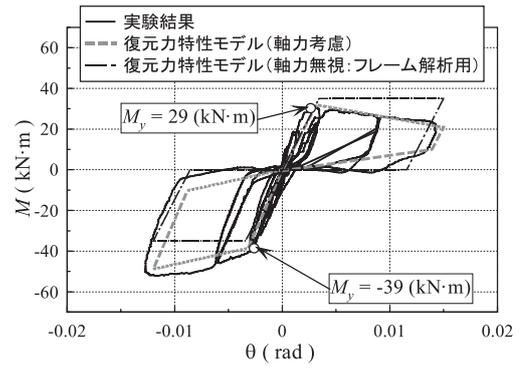
ほぼ一致している。また、左右の柱脚曲げモーメントの差異がある点A、B、Dのいずれの場合においても、左右の柱頭部の曲げモーメントの比は0.98～1.02程度であり、大きな差異は生じていない。このように、本試験体のようなディテール(柱の耐力に比較して柱脚の降伏曲げ耐力が小さい:表1参照、アンカーボルト1列分の降伏軸力より小さい範囲の変動<sup>13,14)</sup>では、柱脚の性能がフレームの応力状態に与える影響は小さいことがわかる。

#### 4.3 柱頭・柱脚部鉛直変位

図9より、各試験体の柱頭部鉛直変位と柱脚部鉛直変位とは、類似した挙動を示しており、フレームの応答に柱脚の変位量が大きく影響することが分かる。ノンスリップ型露出柱脚では、鉛直変位は2(mm)程度であるのに対して、従来型露出柱脚では、最大で3(mm)以上の変位が生じている。これは、変形概念図にも示してあるように、ノンスリップ型露出柱脚では、楔の機能によりアンカーボルトのナットとベースプレート間の隙間が埋められ、いずれのサイクルにおいても柱脚が鉛直上方向に変位しようとした際に、アンカーボルトが抵抗して変位を抑えるためである。一方、従来型露出柱脚では、アンカーボルトの塑性伸びによる隙間が生じているため、柱脚が鉛直上方向に変位する

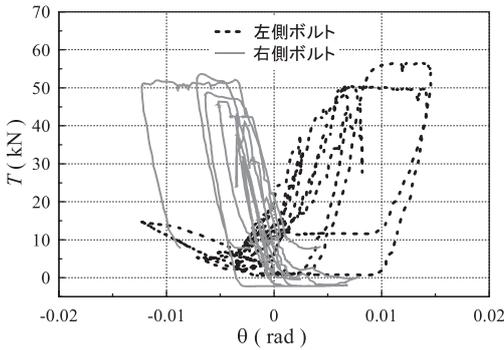


(a) ノンスリップ型露出柱脚

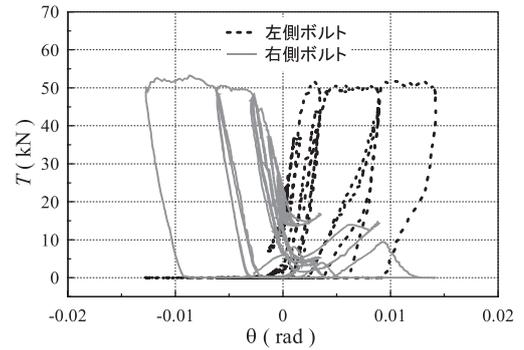


(b) 従来型露出柱脚

図 10 柱脚部曲げモーメント  $M$  - ベースプレート回転角  $\theta$  関係

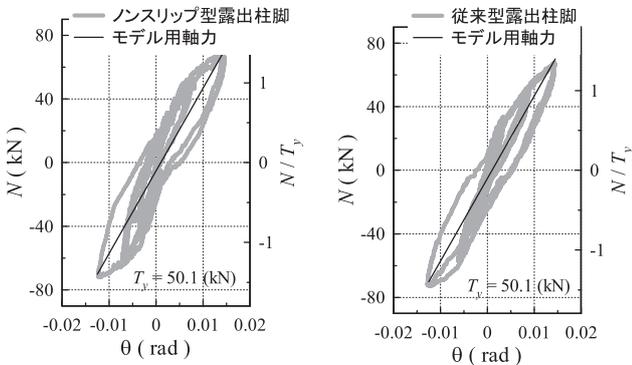


(a) ノンスリップ型露出柱脚



(b) 従来型露出柱脚

図 11 アンカーボルト軸力  $T$  - ベースプレート回転角  $\theta$  関係



(a) ノンスリップ型露出柱脚

図 12 柱軸力  $N$  - ベースプレート回転角  $\theta$  関係

場合、アンカーボルトのナットとベースプレートとが接触するまで、鉛直上方向変位が生じるためである。

#### 4.4 柱脚曲げモーメント-ベースプレート回転角

図 10 より、ノンスリップ型露出柱脚は原点立上り型復元力特性を、従来型露出柱脚はスリップ型復元力特性を示している。これは、楔デバイスの機能により、図 11 から分かるように、アンカーボルトにスリップ現象が生じないためである。

次いで、正方向と負方向とで、弾性回転剛性および曲げ降伏耐力が大きく異なる。これは、図 12 に示すように、

柱脚に作用する軸力が正負で異なり、正方向では引張軸力により耐力が現象、負方向では圧縮軸力により耐力が増加するためである。このため、本論文の解析モデルに用いた、無軸力下の復元力特性モデルは実験結果を追跡できていない。

尚、正方向荷重に比較して負方向荷重の最大回転角が小さいが、これは、柱脚の回転剛性（耐力）の違いにより、柱脚部分に作用する回転角が変化したためである。また、ノンスリップ型露出柱脚の試験体において、溶接による入熱でベースプレートが反り変形しており、この影響で、正方向 0.005 (rad) 以下の範囲では、従来型露出柱脚と比較して低目の降伏曲げ耐力・弾性回転剛性を示している。

#### 4.5 柱軸力について

図 12 より、ノンスリップ型露出柱脚および従来型露出柱脚共に、柱軸力の変動は、ほぼ類似した挙動を示している。履歴ループが生じているものの、本試験体のようなフレームの側柱に作用する変動軸力が、ベースプレート回転角とほぼ線形関係に近いことが分かる。また、同図中に近似直線を示している。この近似直線式を用いて文献 13)、14) に示した復元力特性モデル定式化により算出した結果を、図 10 に併せて示しているが、実験結果とほぼ対応している。

以上、ノンスリップ型・従来型露出柱脚付門型フレームの架構実験を行い、それぞれの結果を比較検討することにより、ノンスリップ型露出柱脚の場合、柱脚のスリップ型復元力特性を改善することで繰返し載荷時のエネルギー吸収量が増加すること、いずれのサイクルにおいても引張軸力が作用することによる鉛直上向き変位を抑えることが出来る点で有利であり、柱脚要素実験と同じ知見が得られた。

## 5. まとめ

ノンスリップ型露出柱脚付き門型フレームの載荷実験を行い、以下の知見を得た。

- 1) ノンスリップ型露出柱脚骨組は従来型露出柱脚の場合と比べ、スリップ現象改善、エネルギー吸収効率向上、柱頭（柱脚）の鉛直変位を減少が期待できる点で有利であり、変動軸力が発生するフレームに適用した場合においても、要素実験と同じ利点が得られる。
- 2) ノンスリップ型および従来型露出柱脚共に、本実験で作用した程度の変動軸力であれば、変動軸力による柱脚の復元力特性の変化を無視した解析モデルでも、フレームの応答（水平荷重 - 水平変位関係）を追跡できた。これは、変動軸力による柱脚の復元力特性の変化を、左右の柱脚で相殺するためと考えられる。
- 3) スリップ現象の有無、変動軸力による左右の柱脚の耐力の差異により、柱頭部の曲げモーメントに大きな差異は生じなかった。このため、本試験体のようなディテールを有する場合、柱脚の性能がフレームの応力状態に与える影響は小さいことがわかる。
- 4) 柱軸力の変動は、ベースプレート回転角に対してほぼ線形関係を示した。また、近似直線に置き換えたモデルを用いて、変動軸力を考慮した柱脚の復元力特性モデルの定式化による結果は、実験結果と良好に対応している。

## 謝 辞

本研究は、広島工業大学「高性能構造システム開発研究センター」（代表者 高松隆夫教授）のプロジェクト研究の一環として実施されました。また、本研究の経費の一部は、社団法人 日本鋼構造協会「平成 19 年度 鋼構造研究助成事業（鋼構造研究グループ）」（ノンスリップ型露出柱脚がラーメン架構に与える影響について、申請代表者：山西央朗）の助成金から支出いたしました。更に、試験体の転造ねじアンカーボルトをフルサト工業株式会社より提供していただきました。ここに記して、感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 高松隆夫, 銅木弘和, 中村慎太郎: 露出型柱脚の復元力特性に関する実験的研究, 鋼構造年次論文報告集, 第 9 巻, pp.415-422, 2001. 11.
- 2) 高松隆夫, 銅木弘和, 中村慎太郎: 鉄骨露出型柱脚の復元力特性に関する研究, 鋼構造年次論文報告集, 第 10 巻, pp.499-506, 2002. 11.
- 3) 高松隆夫, 銅木弘和, 中村慎太郎: 改良型復元力特性を有する鉄骨露出柱脚に関する研究, 鋼構造年次論文報告集, 第 11 巻, pp.563-570, 2003. 11.
- 4) 高松隆夫, 玉井宏章, 山西央朗, 石原節夫, 松尾彰: 既存屋内運動場露出柱脚の復元力特性について, 鋼構造年次論文報告集, 第 12 巻, pp.281-288, 2004. 11.
- 5) Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI, Non-slip-type restoring force characteristics of exposed-type column base, Journal of Constructional Steel Reserch, Vol.61, pp.942-961, 2005.
- 6) 高松隆夫, 玉井宏章, 山西央朗: ノンスリップ型鉄骨露出柱脚の復元力特性モデル, 構造工学論文集, Vol.51B, pp.293-302, 2005. 3.
- 7) 高松隆夫, 玉井宏章, 山西央朗, 松尾彰: ノンスリップ型露出柱脚のセルフセンタリング性能に関する研究, 鋼構造年次論文報告集, 第 13 巻, pp.173-180, 2005. 11.
- 8) 玉井宏章, 高松隆夫, 山西央朗, 白木剛, 多田元秀: 統合化評価法を用いた実大ノンスリップ型露出柱脚の仮動的実権, 鋼構造年次論文報告集, 第 14 巻, pp.269-276, 2006. 11.
- 9) 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 松尾彰: アンカーボルトを多数配列したノンスリップ型露出柱脚の復元力特性 - 無軸力下の場合のセルフセンタリング性能 -, 日本建築学会構造系論文集, 第 621 号, pp.155-162, 2007. 11.
- 10) 高松隆夫, 玉井宏章, 山西央朗, 松村高良, 石原節夫, 松尾彰: 既存屋内運動場露出柱脚の復元力特性と楔デバイスによる耐震改修工法について, 構造工学論文集, Vol.54B, pp.715-722, 2008. 3.
- 11) 松村高良, 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 松尾彰: 2 軸曲げを受けるアンカーボルト降伏先行型露出柱脚の復元力特性, 鋼構造年次論文報告集, 第 16 巻, pp.275-282, 2008. 11.
- 12) 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 松村高良, 松尾彰: 2 軸曲げを受ける従来型およびノンスリップ型露出柱脚に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 73 巻 第 634 号 pp.2223-2230, 2008. 12.

- 13) 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 小澤拓雄, 松尾彰: 変動軸力を受けるアンカーボルト降伏先行型露出柱脚の復元力特性, 鋼構造年次論文報告集, 第16巻, pp.283-290, 2008. 11.
- 14) 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 松村高良, 松尾彰: 引張領域を含む変動軸力を受けるノンスリップ型露出柱脚の抵抗特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻 第642号 pp.1495-1502, 2009. 8. (印刷中)
- 15) 高松隆夫, 玉井宏章, 岡部政和, 澤田樹一郎, 松尾彰: アンカーボルト降伏先行型露出柱脚付きラーメン架構の振動台実験, 鋼構造年次論文報告集, 第16巻, pp.545-552, 2008. 11.
- 16) 澤田樹一郎, 高松隆夫, 玉井宏章, 松尾彰, 山西央朗: 地震応答解析によるノンスリップ型露出柱脚付鋼構造骨組のセルフセンタリング性能と累積損傷応答評価日本建築学会構造系論文集, 第73巻 第629号, pp.1151-1157, 2008. 7.
- 17) 秋山宏: 鉄骨柱脚の耐震設計, 技報堂出版, 1985. 3.
- 18) 伊藤倫夫, 三谷勲, 大谷恭弘, 藤永隆, 田中秀宣: 基礎部の配筋を簡略化したアンボンド型アンカーボルトを用いた露出柱脚の構造性能, 鋼構造論文集, 第8巻 第31号, pp.43-55, 2001. 9.
- 19) 田中秀宣, 亀元靖彦, 三谷勲, 藤永隆, 伊藤倫夫: 変動軸力を受ける露出型柱脚の曲げ挙動と復元力特性, 鋼構造論文集, 第10巻 第39号, pp.39-49, 2003. 9.
- 20) 田中秀宣, 三谷勲, 嶋村洋子, 伊藤倫夫: 変動軸力を受ける露出柱脚を有する鋼構造骨組の弾塑性挙動, 鋼構造論文集, 第12巻 第45号, pp.171-184, 2005. 3.
- 21) 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 松尾彰: 単調載荷下における鉄骨露出柱脚のFEM解析, 鋼構造年次論文報告集, 第14巻, pp.689-696, 2006. 11.